

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Пушин В.Г., Куранова Н.Н., Пушин А.В.

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия, pushin@imp.uran.ru

Как известно, создание новых материалов и технологий их производства всегда являлось одной из важных задач физического материаловедения. Подавляющее большинство металлических материалов, предназначенных для различных сфер деятельности человека, используется в качестве конструкционных. Другой общностью материалов, назначение и применение которых в основном определяется их особыми и подчас уникальными физико-техническими характеристиками, являются так называемые функциональные материалы. К ним относятся различные материалы со специальными свойствами (электрическими, магнитными, температурно зависящими, химическими и др.). Ярким представителем функциональных и одновременно конструкционных материалов являются так называемые интеллектуальные (или smart) металлические сплавы с термоупругими мартенситными превращениями (ТМП) и эффектами памяти формы (ЭПФ). В последние 25-30 лет самые разные сплавы, которые испытывают ТМП, были исследованы прежде всего структурными методами и накоплены обширные данные, касающиеся различных аспектов ТМП. В преддверии ТМП были обнаружены предпереходные или предмартенситные явления (размягчение упругих модулей и фононных мод, особые наноструктурные состояния). Установлено, что сплавы на основе никелида титана в этом классе материалов выделяет комплекс чрезвычайно важных характеристик: самые высокие прочностные и пластические свойства, уникальные эффекты термомеханической памяти (ЭПФ и сверхупругости) высокая надежность, термомеханическая, механотермическая и термоциклическая долговечность, свариваемость, жаропрочность, коррозионная стойкость, биологическая совместимость. В то время как многие другие сплавы с ЭПФ - потенциальные кандидаты для практического использования по их поведению в монокристаллическом состоянии, не обладают многими необходимыми для применения характеристиками (в том числе достаточной пластичностью и деформируемостью) в поликристаллическом состоянии. Эти обстоятельства пока делают незаменимыми сплавы никелида титана, и обуславливают в настоящее время и в будущем их широкое, а в ряде случаев, например в медицине, в электронике и электротехнике, в авиации и космонавтике, на транспорте и в бытовой технике исключительное практическое применение в качестве функционального материала нового поколения.

Представлен обзор современного состояния проблемы создания поликристаллических сплавов с ТМП и ЭПФ в высокопрочном и пластичном состоянии. Для целого ряда полученных в мелкозернистом состоянии квазибинарных сплавов на основе никелида титана, легированных железом, кобальтом, медью, цирконием, гафнием, палладием, платиной, золотом, установлены основные зависимости критических температур ТМП от концентрации легирующих добавок (рис. 1). Обнаружено, что критические температуры ТМП и механические свойства сплавов очень чувствительны к отклонению их химического состава от квазибинарного, что обусловлено возможными процессами распада с выделением охрупчивающих фаз и изменением степени атомного порядка в B2- матрице.

Контролируемое поликомпонентное легирование сплавов на основе никелида титана, учитывающее изменение химического состава В2 аустенита при выделении избыточных фаз, позволяет регулировать их стабильность по отношению к ТМП.

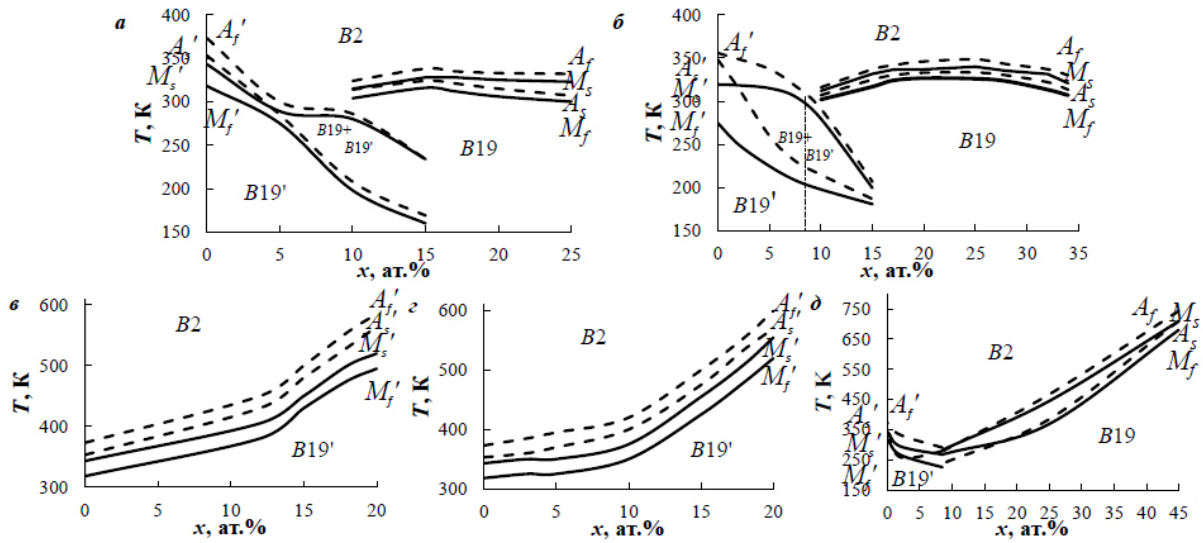


Рисунок 1- Диаграммы ТМП МЗ сплавов $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ ($x \leq 25$ ат.%) (а), $Ni_{50}Ti_{50-x}Hf_x$ ($0 \leq x \leq 20$) (в), $Ni_{49.5}Ti_{50.5-x}Zr_x$ ($0 \leq x \leq 20$) (г) и $Ti_{50}Ni_{50-x}Pd_x$ ($0 \leq x \leq 45$) (д) и УМЗ сплавов $Ti_{50}Ni_{50-x}Cu_x$ ($x \leq 35$ ат.%) (е)

Применение разных методов термической и термомеханической обработки обеспечивает достаточно эффективное изменение их зеренной структуры, тонкой структуры и морфологии мартенситных фаз (рис. 2) и открывает уникальные возможности управления фазовыми превращениями и связанными с ними физико-механическими свойствами. Мелко- и ультрамелкозернистые (МЗ, УМЗ) сплавы можно получать, используя высокотемпературные термомеханические обработки (ВТМО) или, например, равноканальное угловое прессование (РКУП) (рис. 3 а).

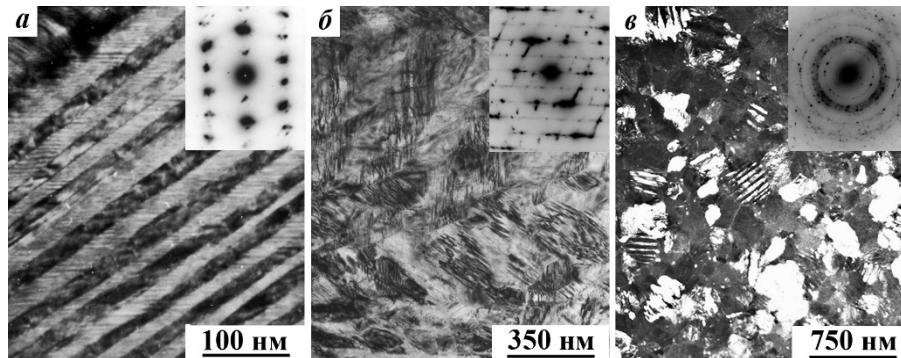


Рисунок 2- Светло- (а, б) и темнопольное (в) электронно-микроскопические изображения и соответствующие электронограммы (на вставках) тонкодвойникованного пакетного В19'-мартенсита МЗ-сплавов $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ (а), $Ni_{50}Ti_{32}Hf_{18}$ (б) и УМЗ $Ni_{45}Ti_{32}Hf_{18}Cu_5$ (в)

Был установлен ряд принципов достижения сверхвысокой прочности УМЗ сплавов на основе никелида титана с ЭПФ за счет мегапластической деформации кручением под высоким давлением (КВД). Максимально эффективно КВД в целях предельного измельчения всех структурных составляющих, и прежде всего зерна, в сплавах на основе TiNi при пониженных температурах деформации ($0,2-0,3 < T_{пл}$), когда накопление дефектов максимально, а развитие релаксационных процессов заторможено. Техника КВД обеспечивает в условиях высокого давления (3-8 ГПа) предельные режимы пластической деформации ($\epsilon = 5-7$ единиц за один полный оборот). Интересно, что деформация на 5-10 оборотов приводит к атомному разупорядочению, а затем и к практически полной аморфизации сплавов. Однако повышение температуры КВД от комнатной до 200-250°C формирует в данных сплавах

нанокристаллическое состояние со средним размером зерен в пределах 10-20 нм, а аморфное состояние получить уже не удастся. Нагрев аморфных КВД-сплавов до неожиданно низких температур (~200°C в отличие от 450-500°C для аморфных быстрозакаленных из расплава, БЗР, сплавов), приводит к началу процесса нанокристаллизации. Физической причиной этого является то, что после КВД аморфная сильно наклепанная матрица уже содержит центры для последующей тотальной нанокристаллизации в виде включений с искаженной, но близкой к В2-решетке атомной структурой. При низкотемпературном отпуске аморфных сплавов на основе TiNi легко удается реализовать высокооднородные по размеру зерен и объему сплавы УМЗ состояния, что очень важно особенно в практическом отношении.

Нанокристаллизация приводит к рекордным значениям прочностных свойств и обеспечивает привлекательные структурную стабильность и свойства также при повышенных температурах испытаний (до 400-500°C), в том числе прочность (до 1,5 МПа) и деформируемость (до 100-120%). Вместе с тем, для таких материалов критически важным становится резкое снижение их пластичности и смена механизма разрушения на хрупкий межкристаллитный и поэтому требуется оптимизация УМЗ структуры, позволяющая повысить их пластичность (рис. 3 б).

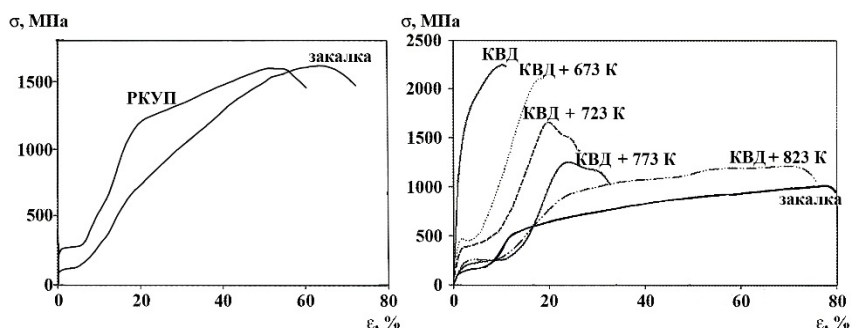


Рисунок 3 - Инженерные кривые «σ-ε» при растяжении сплава Ti_{49,4}Ni_{50,6}: а) после закалки и РКУП (8 проходов при 723 К); б) после закалки, КВД на 5 оборотов и последующих отжигов

В заключение отметим, что к новому перспективному классу материалов с высокотемпературными и магнитоуправляемыми ТМП и ЭПФ относятся квазибинарные сплавы на основе Ni-Mn с аналогичной мартенситной морфологией (рис. 4).

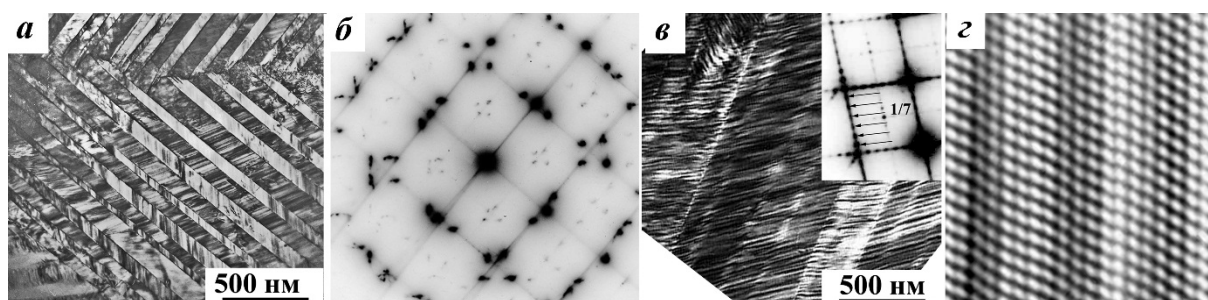


Рисунок 4- ПЭМ изображения 2М-(а) и 14М-мартенсита (в), соответствующие микроэлектронogramмы (б и в, на вставке) и картина прямого атомного разрешения 14М-мартенсита (г)

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «Структура» №АААА-А18-118020190116-6, а также по РНФ №15-12-10014.